



REC'D 18 FEB 2005

WIPO

PCT

# BREVET D'INVENTION

**CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION**

## COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 27 DEC. 2004

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

**DOCUMENT DE  
PRIORITÉ**  
**PRÉSENTÉ OU TRANSMIS  
CONFORMÉMENT À LA RÈGLE  
17.1. a) OU b)**

Martine PLANCHE

**INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE**

**SIEGE**  
26 bis, rue de Saint-Petersbourg  
75000 PARIS cedex 08  
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04  
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23  
www.inpi.fr





26 bis, rue de Saint Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08  
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

# BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



N° 11354\*03

## REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

page 1/2



Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 @ W/ 210502

Réservé à l'INPI

REMISE DES PIÈCES  
DATE

LIEU

N° D'ENREGISTREMENT

NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI

DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE

PAR L'INPI

19 DEC 2003

38 INPI GRENOBLE

0314973

19 DEC. 2003

Vos références pour ce dossier **PA1819FR**  
(facultatif)

**1** NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE  
À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE

**Cabinet Hecké**  
**World Trade Center - Europole**  
**5, place Robert Schuman**  
**BP 1537**  
**38025 Grenoble Cedex 1**

Confirmation d'un dépôt par télécopie

☐ N° attribué par l'INPI à la télécopie**2** NATURE DE LA DEMANDE

Demande de brevet

Demande de certificat d'utilité

Demande divisionnaire

*Demande de brevet initiale**ou demande de certificat d'utilité initiale*Transformation d'une demande de  
brevet européen *Demande de brevet initiale*

Cochez l'une des 4 cases suivantes



Date

Date

Date

**3** TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)**Structure vibrante micro-usinée et microgyromètre associé****4** DÉCLARATION DE PRIORITÉ

OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE

LA DATE DE DÉPÔT D'UNE

DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE

Pays ou organisation

Date

N°

Pays ou organisation

Date

N°

Pays ou organisation

Date

N°

☐ S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»**5** DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)☒ Personne morale☐ Personne physiqueNom  
ou dénomination sociale

Prénoms

Forme juridique

N° SIREN

Code APE-NAF

Domicile

ou

siège

Rue

Code postal et ville

Pays

**Commissariat à l'Energie Atomique**

Etablissement Public de Caractère scientifique, technique et industriel

**31- 33 rue de la Fédération****75752 Paris****française**

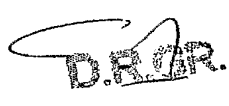
N° de télécopie (facultatif)

Nationalité

N° de téléphone (facultatif)

Adresse électronique (facultatif)

☐ S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»Remplir impérativement la 2<sup>ème</sup> page

REMISE DES PIÈCES DATE <b>19 DEC 2003</b> LIEU <b>38 INPI GRENOBLE</b> N° D'ENREGISTREMENT <b>0314973</b> NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI <b>PA1819FR</b>	
<b>6 MANDATAIRE (s'il y a lieu)</b> Nom Prénom Cabinet ou Société  N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel  Adresse Rue Code postal et ville Pays N° de téléphone (facultatif) N° de télécopie (facultatif) Adresse électronique (facultatif)		<b>Hecké Gérard</b> <b>Jouvray Marie-Andrée</b> <b>Cabinet Hecké (S.A.)</b>  <b>World Trade Center - Europole</b> <b>5, place Robert Schuman - BP 1537</b> <b>38025 Grenoble Cedex</b> <b>France</b> <b>04 76 84 95 45</b> <b>04 76 84 95 48</b> <b>hecke@dia.oleane.com</b>	
<b>7 INVENTEUR (S)</b> Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		<b>Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques</b> <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)	
<b>8 RAPPORT DE RECHERCHE</b> Établissement immédiat ou établissement différé Paiement échelonné de la redevance (en deux versements)		<b>Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)</b> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <b>Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt</b> <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non	
<b>9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES</b>		<b>Uniquement pour les personnes physiques</b> <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention (joindre un avis de non-imposition) <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention (joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence): AG	
<b>10 SÉQUENCES DE NUCLEOTIDES ET/OU D'ACIDES AMINÉS</b> Le support électronique de données est joint La déclaration de conformité de la liste de séquences sur support papier avec le support électronique de données est jointe Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes		<input type="checkbox"/> Cochez la case si la description contient une liste de séquences <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
<b>11 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE</b> (Nom et qualité du signataire)		<b>VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI</b>	
<b>Gérard Hecké</b> <b>CPI 95-1201</b>  <b>Marie-Andrée Jouvray</b> <b>CPI 01-0410</b>			

## Structure vibrante micro-usinée et microgyromètre associé

### Domaine technique de l'invention

5

L'invention concerne une structure vibrante micro-usinée comportant une extrémité d'ancrage, solidaire d'un support fixe, et au moins une paroi vibrante, dans laquelle sont générées des ondes progressives ou stationnaires et comportant une base et une extrémité libre.

10

L'invention concerne également un microgyromètre utilisant la structure vibrante.

15

### État de la technique

20

Les résonateurs vibrants sont employés dans des domaines très divers, comme les capteurs ou les actionneurs. Une structure vibrante constitue l'élément principal d'un résonateur vibrant et comporte des moyens d'ancrage à un support fixe. Dans les structures vibrantes connues, ces moyens d'ancrage provoquent une perte d'énergie dans le support fixe et peuvent générer, par exemple, une perturbation du mouvement, ce qui réduit les performances du résonateur vibrant. Par une conception spécifique en trois dimensions de la structure vibrante, l'énergie de déformation peut être concentrée vers une

25

extrémité de la structure, appelée extrémité libre. Le dimensionnement est étudié pour que l'amplitude de déformation évolue progressivement en se réduisant de l'extrémité libre vers l'extrémité d'ancrage de la structure. Une partie de la structure vibrante, proche de l'extrémité d'ancrage, est assimilable à un nœud de déformation non ponctuel restant invariant en rotation et formant

une zone de découplage sur laquelle peuvent être placés les moyens d'ancrage. Ainsi, les perturbations qui affectent les moyens d'ancrage ne sont pas transmises au système d'ondes engendrées par la vibration. La zone d'ancrage est donc naturellement découplée de la structure vibrante.

5

Les performances d'un résonateur vibrant déterminent en partie les performances de l'appareil dans lequel il est utilisé. Les qualités principales d'un résonateur sont les suivantes :

10

- une maîtrise des modes de vibration et de la pureté des fréquences de résonance, ce qui implique des contraintes de symétrie et de contrôle de la fabrication de la structure vibrante,

- une insensibilité aux perturbations extérieures, ce qui suppose des structures vibrantes avec des configurations anti-symétriques parfaites ou des configurations symétriques,

15

- un coefficient de qualité (finesse de la réponse en fréquence et gain élevé), obtenu en associant la fonction de découplage entre le support fixe et la structure vibrante,

20

- une insensibilité aux paramètres d'environnement, ce qui implique des structures vibrantes avec des moyens d'ancrage présentant une bonne disposition à minimiser les effets des variations d'environnement.

25

Il a déjà été proposé d'employer un résonateur vibrant comme gyromètre. De nombreux documents concernent les gyromètres, notamment le calcul de leurs dimensions et l'évaluation de leurs performances. Le principe d'un gyromètre est le même quelle que soit sa forme. Lorsque la structure vibrante du gyromètre est mise en rotation, une force de Coriolis s'exerce sur les parois vibrantes de la structure et modifie alors son état d'équilibre. Cette force de Coriolis résulte de la vitesse de l'onde et de la vitesse de rotation à mesurer. La symétrie parfaite de la structure vibrante permet d'avoir, pour chaque mode de

résonance, un second mode équivalent à 45 degrés du premier. Les modes d'excitation et de détection du résonateur sont donc parfaitement couplés et excités à leur fréquence de résonance.

- 5 Les figures 1 et 2 représentent, respectivement en coupe et en vue de dessus, la structure vibrante actuellement la plus performante pour un gyromètre, grâce à sa symétrie parfaite et à son dimensionnement spécifique. C'est la structure vibrante hémisphérique HRG (« Hemispherical Rate Gyro »), qui repose sur le principe du verre à pied. Elle se compose d'un corps vibrant 1 en forme de
- 10 demi-sphère creuse, ancrée sur un pied 2 solidaire d'un support fixe 3. Les avantages d'une telle géométrie sont les suivants :
- la forme de révolution en trois dimensions est favorable à la génération d'ondes stationnaires faciles à calculer et à stabiliser,
  - la forme en demi-sphère du corps vibrant 1 crée un nœud de déformation
- 15 absolu à l'ancrage de la structure, qui est le seul nœud spécifique à rester invariant en rotation.

Le corps vibrant 1 de cette structure est donc constamment et naturellement découplé de son support fixe 3, grâce à la présence du pied 2. Cependant, cette

20 structure vibrante n'est pas adaptée aux technologies de micro-usinage. Particulièrement pour la fabrication d'un microgyromètre, l'usinage précis d'une demi-sphère est complexe et coûteux en usinage standard et impossible en micro-usinage.

25 Le document WO-A-9922203 décrit une structure vibrante reposant sur un principe analogue mais avec un corps vibrant 1 creux, de forme cylindrique (figure 3), ancré sur le pied 2. La paroi du corps vibrant 1 est alors parfaitement verticale. Cette structure est avantageuse du point de vue technologique car le micro-usinage d'un cylindre est facile.

Cependant, les performances d'une structure vibrante cylindrique portée par un pied ne sont pas satisfaisantes, car elles ne se rapprochent pas des performances optimales de la structure vibrante hémisphérique selon la figure 1.

5 Ce type de gyromètre avec une structure vibrante de forme cylindrique est donc intéressant en termes de micro-usinage, mais pas en termes de performances de résonateur.

## 10 **Objet de l'invention**

L'objet de l'invention consiste à réaliser une structure vibrante ne présentant pas ces inconvénients et, en particulier, une structure vibrante adaptée aux technologies de micro-usinage et permettant d'assurer un découplage naturel,

15 en termes de propagation des ondes, entre la paroi vibrante et la partie d'ancrage.

Selon l'invention, ce but est atteint par le fait qu'une zone naturellement découplée est située entre l'extrémité d'ancrage et l'extrémité libre de la paroi vibrante et en ce que l'extrémité d'ancrage est constituée par la base de la paroi vibrante.

20

Selon un développement de l'invention, la structure vibrante comporte une coque creuse ayant une paroi latérale, constituant la paroi vibrante, et une base, constituant l'extrémité d'ancrage.

25

Selon un mode de réalisation préférentiel, la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur variable, d'une première valeur à l'extrémité libre à une seconde valeur, supérieure à la première, à la base de la coque creuse.



L'invention concerne également un microgyromètre comportant une telle structure vibrante, et comportant des électrodes formées dans le même substrat que la paroi vibrante de la structure vibrante.

5

Selon un développement de l'invention, le microgyromètre comporte deux structures vibrantes disposées symétriquement et scellées par leurs supports fixes respectifs.

10

### **Description sommaire des dessins**

D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de différents modes particuliers de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs et représentés aux dessins annexés, dans lesquels :

15

Les figures 1 à 3 représentent en coupe (figures 1 et 3) et en vue de dessus (figure 2) deux structures vibrantes selon l'art antérieur.

20

Les figures 4 et 5 représentent un premier mode de réalisation d'une structure vibrante selon l'invention, respectivement en perspective et en coupe verticale.

Les figures 6 et 7 représentent deux variantes de réalisation d'une structure vibrante selon l'invention.

25

Les figures 8 à 14 sont des vues en coupe de différents modes de réalisation de la paroi vibrante d'une structure vibrante selon l'invention.

Les figures 15 à 17 sont des vues en coupe de trois variantes de réalisation de la base de la paroi vibrante selon les figures 8 à 14.

Les figures 18 à 22 illustrent des modes particuliers de fabrication de la structure vibrante selon l'invention.

Les figures 23 à 27 illustrent plusieurs modes de réalisation d'un microgyromètre comportant une structure vibrante selon l'invention.

## 5 Description de modes particuliers de réalisation

10 Selon l'invention, la structure vibrante d'un microgyromètre à base d'ondes progressives et stationnaires a une géométrie spécifique. La structure vibrante, particulièrement adaptée aux technologies de micro-usinage, est conçue de façon à comporter une zone naturellement découplée, dans laquelle peu d'énergie se dissipe. Les moyens d'ancrage sont localisés dans cette zone de manière à éviter qu'ils influencent le comportement de la structure vibrante. Le pied des structures vibrantes selon l'art antérieur est ainsi supprimé.

15 La figure 4 représente un premier mode de réalisation d'une structure vibrante selon l'invention. La structure vibrante 4 comporte une extrémité d'ancrage 5 sur un support fixe 6 et une paroi vibrante 7, avec une base 8 et une extrémité libre 9. La paroi vibrante 7 est constituée par une coque creuse de forme cylindrique. La base 8 de la coque creuse constitue l'extrémité d'ancrage 5 de la structure  
20 vibrante 4. Des ondes progressives ou stationnaires sont générées sur la partie utile de la paroi vibrante 7. Contrairement aux structures vibrantes connues illustrées aux figures 1 à 3, la structure vibrante 4 ne comporte pas de pied. Elle comporte une zone naturellement découplée au niveau de l'extrémité d'ancrage 5 de la paroi vibrante 7, obtenue par le dimensionnement de la paroi vibrante 7.

25

La figure 5 illustre cette conception particulière de la paroi vibrante 7. Elle représente une vue en coupe verticale de la structure vibrante 4 selon la figure 4. La paroi vibrante 7 a une hauteur H, tandis que la partie utile de la paroi vibrante 7, dans laquelle sont générées et analysées les ondes, a une hauteur

h'. La partie d'ancrage, correspondant à la zone naturellement découplée, a une hauteur h ( $h + h' = H$ ). Plus la hauteur h est petite, plus la hauteur h' est grande et plus les caractéristiques de la vibration sont améliorées. Cependant la hauteur h doit toujours être supérieure à une hauteur  $h_c$ , correspondant à la hauteur de la zone d'influence des contraintes engendrées par le support fixe 6. En effet, plus la hauteur h est petite, moins la partie utile est découplée du support fixe 6 et plus la vibration risque d'être perturbée. Les dimensions de la paroi vibrante 7 doivent donc être choisies pour optimiser les performances de la structure vibrante 4.

Les figures 6 et 7 illustrent une variante de réalisation de la structure vibrante 4 selon l'invention, qui se distingue de la précédente par le fait que la paroi vibrante n'est pas constituée par une coque creuse mais par une poutre de section pleine. Sur la figure 6, la structure vibrante 4 est de type diapason. Elle comporte deux parois vibrantes 7, constituées chacune par une poutre pleine. Les deux poutres sont espacées l'une par rapport à l'autre, parallèles entre elles et sensiblement perpendiculaires au support fixe 6. La base 8 de chaque poutre peut être carrée, rectangulaire ou circulaire et constitue une partie de l'extrémité d'ancrage 5 de la structure vibrante 4. Sur la figure 7, la structure vibrante 4 est de type quapason, c'est-à-dire avec quatre poutres pleines, parallèles entre elles et sensiblement perpendiculaires au support fixe 6. Comme sur la figure 6, la base 8 de chaque poutre peut être carrée, rectangulaire ou circulaire et constitue une partie de l'extrémité d'ancrage 5 de la structure vibrante 4. Dans le cas du quapason, les quatre poutres sont disposées de manière à définir les quatre coins d'un polygone à quatre côtés, par exemple un carré ou un rectangle.

D'autres variantes de réalisation sont illustrées aux figures 8 à 15, qui représentent, en coupe, différentes formes d'une paroi vibrante 7 dont la base 8 a une section interne circulaire (figure 15).

- 5 Sur la figure 8, la paroi vibrante 7 a une forme cylindrique, l'épaisseur  $e$  de la paroi vibrante 7 restant constante de l'extrémité libre 9 à l'extrémité d'ancrage 5.

- 10 La figure 9 représente une paroi vibrante 7 ayant une face externe de forme tronconique. Le rayon interne  $R$  de la coque creuse reste constant (la face interne de la paroi vibrante 7 est donc de forme cylindrique) et l'épaisseur  $e$  de la paroi vibrante 7 évolue d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

- 15 Dans la variante de réalisation selon la figure 10, la paroi vibrante 7 est de forme tronconique, avec une épaisseur  $e$  constante. Le rayon interne  $R$  de la paroi vibrante 7 évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

- 20 La figure 11 représente une paroi vibrante 7 de forme externe cylindrique, avec une face interne de forme tronconique. L'épaisseur  $e$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5, tandis que le rayon interne  $R$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

- 25 La figure 12 représente une paroi vibrante 7 de forme externe cylindrique, dont l'épaisseur  $e$  évolue d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5. Le rayon interne  $R$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une

deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5. Dans cet exemple de réalisation, contrairement aux parois vibrantes selon les figures 9 et 11 dans lesquelles l'évolution de l'épaisseur  $e$  se fait de manière linéaire, cette évolution est non-linéaire et la face interne de la coque creuse est incurvée au niveau de l'extrémité d'ancrage 5.

La figure 13 représente une paroi vibrante 7 de forme externe tronconique, dont l'épaisseur  $e$  évolue de manière linéaire, de manière à ce que la face interne de la paroi vibrante 7 soit également de forme tronconique. L'épaisseur  $e$  de la coque creuse évolue ainsi d'une première valeur  $e_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5, tandis que le rayon interne  $R$  de la coque creuse évolue d'une première valeur  $R_1$  à l'extrémité libre 9 à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

La figure 14 représente une paroi vibrante 7 dont l'épaisseur  $e$  évolue de manière non-linéaire. L'épaisseur de la paroi vibrante 7 conserve, à partir de l'extrémité libre 9 et sur sensiblement la moitié de la hauteur  $H$ , une première valeur  $e_1$  et évolue ensuite jusqu'à une deuxième valeur  $e_2$ , supérieure à  $e_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5. Le rayon interne  $R$  évolue également de manière non-linéaire d'une première valeur  $R_1$ , à l'extrémité libre 9 et sur sensiblement la moitié de la hauteur  $H$ , à une deuxième valeur  $R_2$ , inférieure à  $R_1$ , à l'extrémité d'ancrage 5.

Sur toutes les figures décrites précédemment, la hauteur  $H$ , correspondant à la profondeur de la paroi vibrante 7 est invariante, quelle que soit la forme de la structure vibrante 4. Le micro-usinage est ainsi facilité, ce qui réduit le coût de fabrication.

La structure vibrante 4 selon les figures 8 et 15, c'est-à-dire avec une paroi vibrante 7 de forme cylindrique et d'épaisseur constante, est la plus simple possible en termes de fabrication. Comme illustré aux figures 9 à 14, il est possible de faire évoluer l'épaisseur  $e$  de la paroi vibrante 7 le long de la hauteur  $H$ , d'une première valeur  $e_1$  au niveau de l'extrémité libre 9 vers une seconde valeur  $e_2$  au niveau de l'extrémité d'ancrage 5 (figures 9, 11-14). L'épaisseur  $e$  de la paroi latérale peut varier linéairement (figures 9, 11 et 13) ou non (figure 12). Il est ainsi possible d'obtenir une grande efficacité de découplage sur une profondeur  $H$  faible.

Bien que la base 8 de la paroi vibrante 7 selon les figures 8 à 15 soit circulaire, de rayon interne  $R$  et d'épaisseur  $e$ , l'invention s'applique également à des parois vibrantes 7 dont la base 8 a une section non circulaire. En effet, il est possible de dessiner des géométries quelconques sur les masques de gravure, dans le cas de gravure à l'aide de gaz réactifs. À titre d'exemple, comme représenté à la figure 16, la base 8 peut être de forme elliptique, avec une épaisseur  $e$  et des paramètres caractéristiques  $a$  et  $b$ , respectivement pour le petit axe et pour le grand axe de la section interne de la paroi vibrante 7. Selon la figure 17, la base 8 peut également être constituée par un anneau de forme rectangulaire de longueur  $L$ , de largeur  $l$  et d'épaisseur  $e$ .

L'optimisation des dimensions d'une structure vibrante 4 selon les figures 4 et 5 fait appel à des formulations mathématiques connues pour le calcul des structures des coques cylindriques. Ces formulations peuvent cependant être appliquées à des formes beaucoup plus diverses, notamment à toutes les coques creuses selon les figures 9 à 14. Dans ce cas, il est possible, soit d'écrire et de résoudre analytiquement le système d'équations correspondant, soit d'utiliser les méthodes numériques de résolution par éléments finis, si les structures sont trop complexes.

Les équations de déformation et de vibration des coques sont décrites de façon très générale dans la publication de Y.M. Fu et C.P. Chen s'intitulant « Non-linear vibration of elastic truncated conical moderately thick shells in large overall motion » (International Journal of Non-Linear Mechanics ; July 2001 ; 36 (5) ; pp 763-771). Le calcul de Fu & Chen décrit le comportement vibratoire d'une structure à coque tronconique. Ce calcul peut être adapté pour une coque cylindrique, notamment pour le calcul de l'épaisseur de la paroi du cylindre où se produisent les vibrations près de l'extrémité libre 9. La forme de la structure vibrante 4 est alors déduite par l'association, du calcul décrit dans la publication de Fu & Chen, du choix des épaisseurs de la paroi vibrante 7 de la coque creuse et du calcul des rayons de la base 8 et de l'extrémité libre 9 de la coque creuse.

La conception d'une structure vibrante 4 selon les figures 6 et 7 nécessite, pour des raisons technologiques de micro-usinage, de réduire la longueur des poutres et d'avoir des parois perpendiculaires au support fixe 6. De la même façon que pour une coque creuse, une résolution mathématique du système d'équations décrivant les modes de vibration des poutres permet de trouver un dimensionnement idéal, tel que la déformée sera maximale à l'extrémité libre 9 et négligeable à l'extrémité d'ancrage 5 de chaque poutre.

La structure vibrante 4 peut être réalisée par simple gravure dans un substrat, par exemple un substrat en silicium (Si), en silicium sur isolant (SOI), ou un substrat surmonté de couches secondaires épitaxiées. L'épaisseur du substrat fixe la hauteur H maximale de la structure vibrante 4. La paroi vibrante 7 et le support fixe 6 sont ainsi constitués par une seule pièce. Selon la forme de la structure vibrante 4, la gravure peut être réalisée en une seule fois, avec un seul niveau de masquage, ou en plusieurs étapes avec plusieurs niveaux de

masquage, les gravures déjà effectuées étant alors protégées par une couche sacrificielle, par exemple un diélectrique de type oxyde, nitrure ou résine épaisse, avant la gravure du niveau suivant. À titre d'exemple, une gravure anisotrope, de type RIE (« Reactive Ion Etching »), c'est-à-dire une gravure ionique réactive en une seule fois, peut être utilisée pour réaliser une paroi vibrante 7 à flancs parfaitement verticaux (figure 8), ou à flancs non verticaux (figures 14). Dans ce dernier cas, il suffit de modifier in situ les conditions de gravure pour passer d'une zone à la suivante.

- 10 Une paroi vibrante 7 selon la figure 12 peut être réalisée en deux étapes par une gravure isotrope humide ou de type RIE, suivie par une gravure anisotrope de type RIE.

- 15 La succession d'une gravure anisotrope humide, par exemple au moyen d'hydroxyde de potassium (KOH) et d'une gravure anisotrope de type RIE peut être utilisée pour réaliser une paroi vibrante 7 selon la figure 11 avec une base 8 carrée ou rectangulaire selon la figure 17.

- 20 De nombreuses autres combinaisons des différentes techniques de gravure peuvent être réalisées, permettant ainsi de réaliser un grand nombre de parois vibrantes 7 de formes différentes.

- 25 Différents modes de réalisation de la structure vibrante 4 vont être décrits au regard des figures 18 à 22, qui illustrent respectivement la fabrication de parois vibrantes 7 selon la figure 14 (figure 18), selon la figure 11 (figure 19) et selon la figure 8 (figures 20 à 22).



Sur la figure 18, la structure vibrante 4 est gravée dans un substrat 10 en silicium massif. Chaque étape de gravure se termine au bout d'un temps prédéterminé en fonction de la forme choisie.

5 Sur la figure 19, le substrat 10 en silicium massif comporte, à sa partie inférieure dans le mode de réalisation représenté, une zone surdopée 11, d'épaisseur sensiblement équivalente ou inférieure au tiers de l'épaisseur du substrat 10. Néanmoins, l'épaisseur de la zone surdopée 11 doit être suffisante pour que le substrat 10 reste suffisamment rigide. À titre d'exemple, l'épaisseur de la zone  
10 surdopée est de l'ordre de 50µm à 100µm. La zone surdopée 11 est réalisée par implantation et recuit à partir d'une face du substrat 10 (face inférieure dans l'exemple représenté). La gravure de la face interne de la structure vibrante 4 est ensuite effectuée à partir de l'autre face, de préférence par gravure humide, par exemple au moyen d'une gravure KOH. En effet, les propriétés du  
15 surdopage local du substrat 10 sont alors utilisées pour créer automatiquement un arrêt de la gravure électrochimique au niveau de la zone surdopée 11. La zone surdopée 11 constitue ainsi le support fixe 6 de la structure vibrante 4.

Sur la figure 20, une couche 12 d'arrêt de la gravure est réalisée sous le  
20 substrat 10. La couche 12 est, de préférence, constituée par un diélectrique de type oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), car il présente une bonne sélectivité par rapport au silicium et n'est pas une source de pollution des équipements. La structure vibrante 4 est ensuite gravée dans toute l'épaisseur du substrat 10 et la couche 12 d'arrêt de gravure constitue le support fixe 6 de la structure vibrante 4.

25 Sur la figure 21, le substrat 10 est un substrat en silicium sur isolant (SOI). Il comporte une couche intermédiaire 13 d'oxyde de silicium enterré ( $\text{SiO}_2$ ). La structure est gravée dans la partie épaisse du substrat 10 et l'arrêt de la gravure s'effectue sur la couche 13 d'oxyde de silicium enterré. La couche 13 constitue

ainsi le support fixe 6 de la structure vibrante 4. Cette méthode de fabrication est particulièrement adaptée aux technologies de micro-usinage sur circuit intégré (« above IC »), dans lesquelles on fabrique d'abord le ou les circuits intégrés que l'on protège pendant que l'on poursuit par la fabrication du capteur ou de l'actionneur. En effet, un film mince 14 du substrat 10 de silicium situé sous la couche intermédiaire 13 permet l'intégration d'autres fonctions dans le composant ainsi constitué, par exemple des circuits intégrés de commande et/ou de lecture. Les contacts entre le film mince 14 et la partie épaisse du substrat 10 sont réalisés par tout procédé connu approprié permettant de fixer les potentiels de la structure usinée.

Le mode de fabrication représenté à la figure 22 se distingue de celui représenté à la figure 21 par une étape supplémentaire de gravure de la couche 13 d'oxyde de silicium enterré. Cette gravure permet de diminuer les effets parasites et les contraintes entre le film mince 14 et la structure vibrante 4 gravée dans la partie épaisse du substrat 10. C'est alors le film mince 14 qui constitue le support fixe 6 de la structure vibrante 4.

Dans tous les cas, la coque creuse permet, malgré sa courte longueur, un découplage effectif de l'extrémité d'ancrage 5 par rapport à l'extrémité libre 9. La zone découplée n'est pas un nœud de déformation non ponctuel et l'extrémité d'ancrage 5 peut être solidaire, sur toute sa circonférence, du substrat 10 qui la supporte.

La structure vibrante 4 décrite ci-dessus présente, notamment les avantages suivants :

- elle permet confiner des ondes progressives dans sa partie utile,

- la perte d'énergie est négligeable dans son support fixe 6 et, au contraire, l'énergie apportée par les moyens d'excitation est concentrée dans sa partie utile,
- la réponse de la structure vibrante 4 est indépendante des conditions de contrainte qui se développent dans son support fixe 6 provenant des conditions d'assemblage, de l'usage de la structure ou des variations des variables d'environnement,
- la structure vibrante 4 est très compacte, ce qui permet le micro-usinage et réduit le coût de production.

La fabrication d'un microgyromètre comportant une structure vibrante selon l'invention va être décrite plus en détail au regard des figures 23 à 27.

Sur les figures 23 et 24, comme sur la figure 20, une couche d'oxyde 12 est réalisée sous le substrat 10 pour délimiter la zone d'arrêt de la gravure. La structure vibrante 4, par exemple de forme cylindrique, et des électrodes 15, disposées, par exemple, de part et d'autre de chaque paroi vibrante 7 de la structure vibrante 4, sont gravées simultanément de manière à former des blocs de silicium isolés entre eux. L'ensemble est complété par une métallisation 16 de surface des électrodes 15 et des parois vibrantes 7. Cette métallisation 16 sert à fixer le potentiel à la masse ou à un autre élément en fonction de l'application envisagée. La métallisation peut être réalisée soit sur la face arrière, à travers des ouvertures formées dans la couche d'oxyde 12 (figure 23), soit sur la face avant. Dans ce cas, une couche d'oxyde 18 à l'extrémité libre des électrodes 15 est formée pour obtenir une meilleure adhérence du métal 16 sur le silicium composant les électrodes 15 (figure 24). La métallisation 16 est réalisée, par exemple, par dépôt, masquage, lithographie et gravure sélective du substrat 10. Il est également possible de réaliser la métallisation 16 après les gravures profondes des parois vibrantes 7 de la structure vibrante 4 grâce à

l'emploi d'un masque mécanique (non représenté) qui protège les zones ne devant pas être métallisées. Il est possible d'effectuer les gravures profondes du substrat 10 après la métallisation 16 en les protégeant si nécessaire par une couche sacrificielle (non représentée).

5

Le mode de réalisation représenté sur la figure 23 est préféré à celui représenté sur la figure 24, car tout autre matériau que le silicium, déposé sur la zone utile des électrodes 15, dégrade très fortement le coefficient de qualité du résonateur.

10

Il est ainsi possible de réaliser un microgyromètre avec un seul substrat 10. Il suffit ensuite de l'intégrer dans un boîtier, d'ajouter des moyens d'excitation de la structure vibrante 4 et de détection des ondes, et d'effectuer un câblage entre les électrodes 15 et le boîtier.

15

Dans une variante de réalisation représentée à la figure 25, deux substrats 10a et 10b, gravés et métallisés comme sur la figure 24, sont ensuite scellés par leurs faces oxydées 12a et 12b avant d'être disposés à l'intérieur d'un boîtier. Les deux substrats 10a et 10b sont ainsi disposés symétriquement par rapport à leurs faces oxydées 12a et 12b, qui constituent le support fixe des structures vibrantes 4a et 4b correspondantes. Le scellement peut être réalisé avant la gravure des parois vibrantes 7a et 7b et des électrodes 15a et 15b. La structure symétrique est ensuite incorporée dans un boîtier et associée à un câblage et des moyens d'excitation de la structure et de détection des ondes pour réaliser le microgyromètre. Une telle structure symétrique permet notamment de minimiser les contributions au bruit mécanique et de distinguer le signal recherché des signaux parasites.

20

25

De manière analogue, une structure symétrique peut être réalisée, comme représenté à la figure 26, avec des métallisations 16a et 16b sur les faces arrières des substrats 10a et 10b, entre les deux couches d'oxyde 12a et 12b, c'est-à-dire à partir de deux substrats du type représenté à la figure 23. Dans ce cas, un des deux substrats est gravé de façon à pouvoir effectuer un câblage 17 des différentes électrodes. Sur la figure 26, le substrat 10a est gravé à sa périphérie et un câblage 17 s'effectue en pourtour de la structure. Il est également possible d'effectuer un câblage 17 à la fois sur le pourtour de la structure et sur la partie centrale du substrat 10a (figure 27) ou uniquement sur la partie centrale (non représenté), pour obtenir un composant plus compact.

La résolution d'un gyromètre comportant une structure vibrante cylindrique selon l'invention peut être environ 100 fois supérieure à celle des gyromètres connus.

L'invention n'est pas limitée aux modes particuliers de réalisation décrits ci-dessus. En particulier, la structure vibrante peut être incorporée dans tout type de résonateur vibrant. Dans les structures symétriques, les électrodes des deux substrats ne sont pas obligatoirement connectées ensemble. Il est également possible d'insérer des surfaces de scellement indépendantes.

## Revendications

- 5 1. Structure vibrante micro-usinée comportant une extrémité d'ancrage (5), solidaire d'un support fixe (6), et au moins une paroi vibrante (7), dans laquelle sont générées des ondes progressives ou stationnaires et comportant une base (8) et une extrémité libre (9), structure vibrante caractérisée en ce qu'une zone naturellement découplée est située entre l'extrémité d'ancrage (5) et l'extrémité libre (9) de la paroi vibrante (7) et en ce que l'extrémité d'ancrage (5) est  
10 constituée par la base (8) de la paroi vibrante (7).
- 15 2. Structure vibrante selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comporte deux parois vibrantes (7), constituées par deux poutres espacées, parallèles entre elles et sensiblement perpendiculaires au support fixe (6).
- 20 3. Structure vibrante selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comporte quatre parois vibrantes (7), constituées par quatre poutres espacées, parallèles entre elles, sensiblement perpendiculaires au support fixe (6) et disposées de manière à définir les quatre coins d'un polygone à quatre côtés.
- 25 4. Structure vibrante selon l'une des revendications 2 et 3, caractérisée en ce que chaque poutre a une section carrée, rectangulaire ou circulaire.
5. Structure vibrante selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comporte une coque creuse ayant une paroi latérale, constituant la paroi vibrante (7), et une base (8), constituant l'extrémité d'ancrage (5).
6. Structure vibrante selon la revendication 5, caractérisée en ce que la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur (e) constante.

7. Structure vibrante selon la revendication 5, caractérisée en ce que la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur variable, d'une première valeur (e1) à l'extrémité libre (9) à une seconde valeur (e2), supérieure à la première (e1), à la base (8) de la coque creuse.

8. Structure vibrante selon la revendication 7, caractérisée en ce que l'épaisseur (e) de la paroi latérale de la coque creuse varie linéairement entre l'extrémité libre (9) et la base (8) de la coque creuse.

9. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisée en ce que la face externe de la paroi latérale de la coque creuse est cylindrique.

10. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, caractérisée en ce que la face externe de la paroi latérale de la coque creuse est tronconique.

11. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 5 à 10, caractérisée en ce que la base (8) de la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur (e, e2) prédéterminée et une section circulaire de rayon (R, R2) prédéterminé.

12. Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 5 à 10, caractérisée en ce que la base (8) de la paroi latérale de la coque creuse a une épaisseur (e, e2) prédéterminée et une section en forme d'ellipse.

- 13.** Structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisée en ce que la paroi vibrante (7) est réalisée dans un substrat (10) en silicium.
- 14.** Structure vibrante selon la revendication 13, caractérisée en ce que le support fixe (6) est réalisé dans le même substrat (10).
- 15.** Structure vibrante selon la revendication 13, caractérisée en ce que le support fixe (6) est constitué par une couche surdopée (11) du substrat (10).
- 16.** Structure vibrante selon la revendication 13, caractérisée en ce que le support fixe (6) est constitué par une couche d'oxyde de silicium (12) formée sous le substrat (10).
- 17.** Structure vibrante selon la revendication 13, caractérisée en ce que le support fixe (6) est constitué par une couche (13) d'oxyde de silicium enterrée dans le substrat (10).
- 18.** Microgyromètre caractérisé en ce qu'il comporte au moins une structure vibrante selon l'une quelconque des revendications 1 à 17, et des électrodes (15) formées dans le même substrat (10) que la paroi vibrante (7) de la structure vibrante (4).
- 19.** Microgyromètre selon la revendication 18, caractérisé en ce qu'il comporte deux structures vibrantes (4a) et (4b) disposées symétriquement et scellées par leurs supports fixes (6) respectifs.



1/9

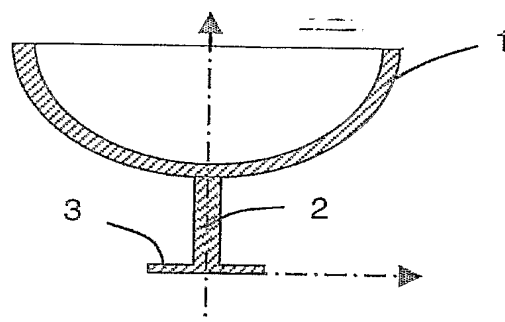


FIG. 1 (art antérieur)

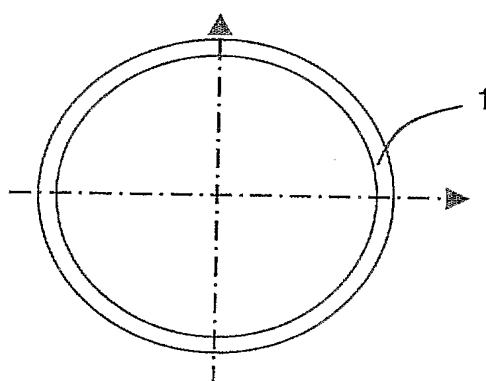


FIG. 2 (art antérieur)

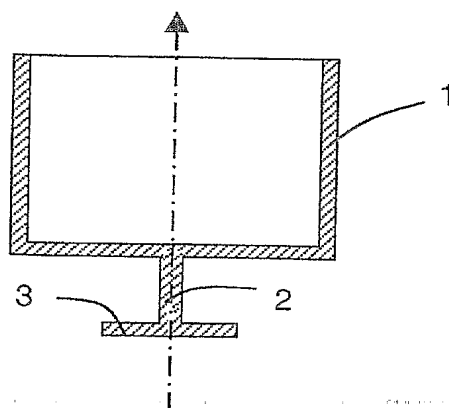


FIG. 3 (art antérieur)

2/9

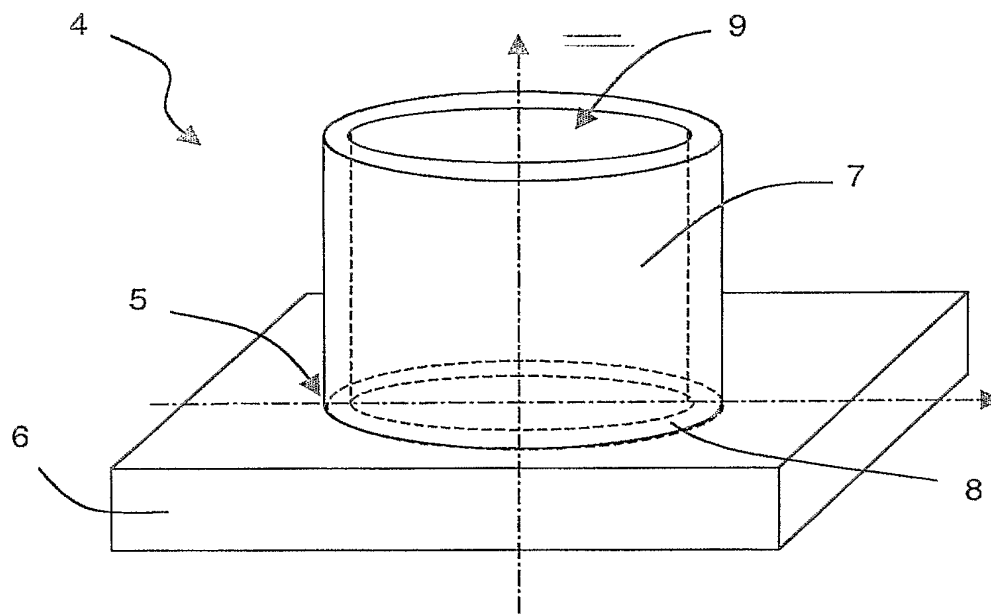


FIG. 4

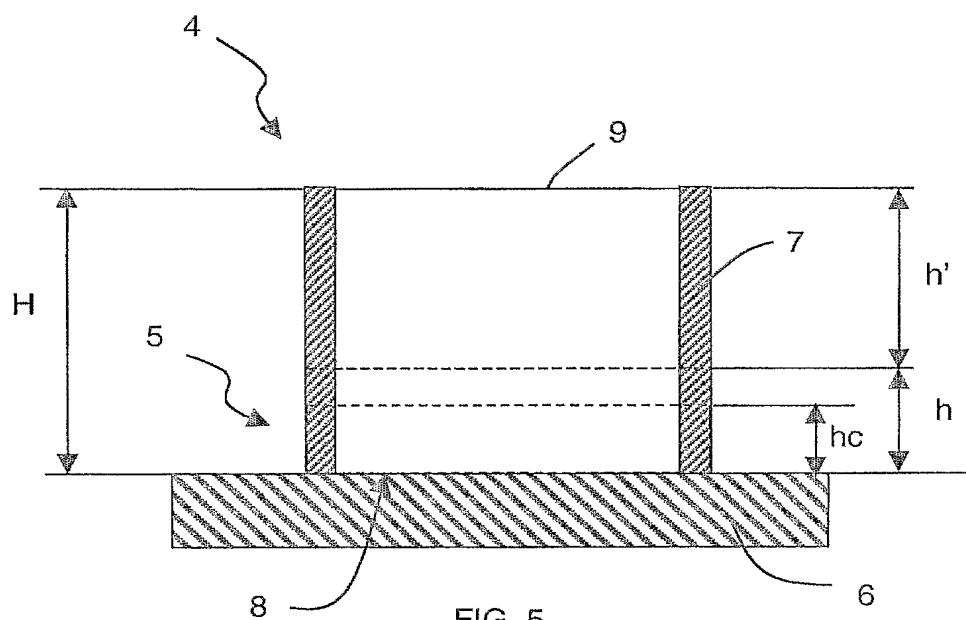
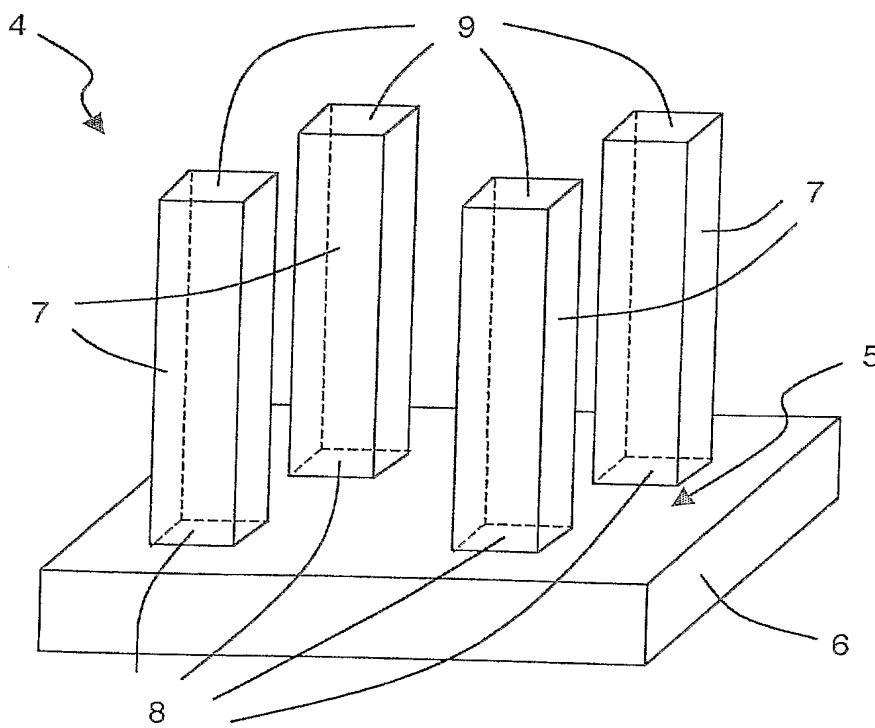
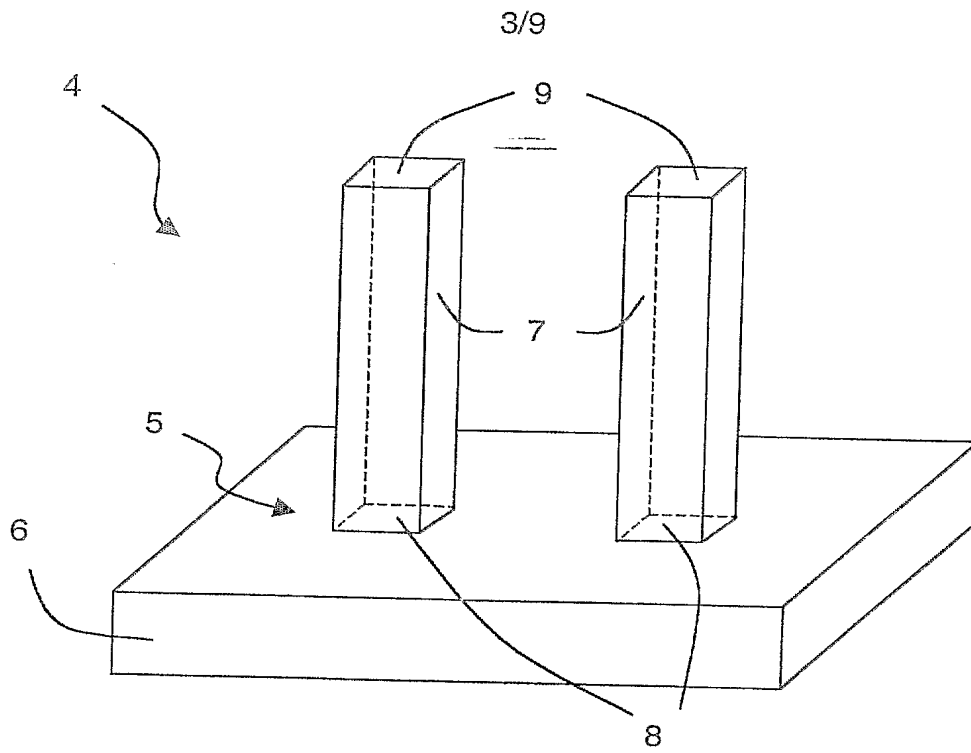
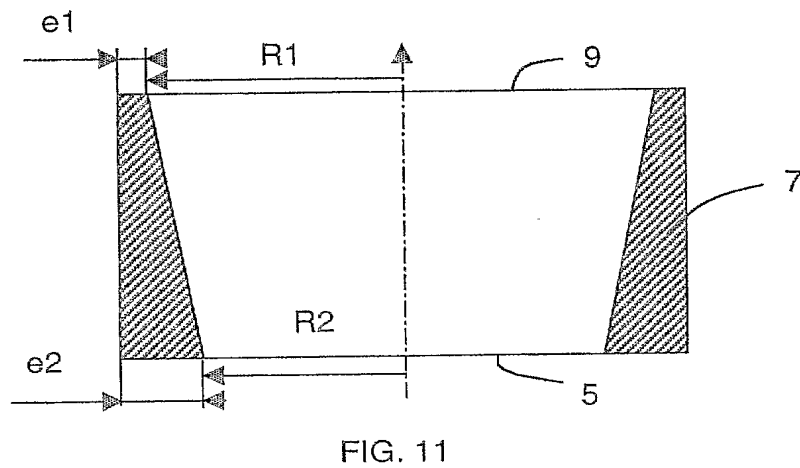
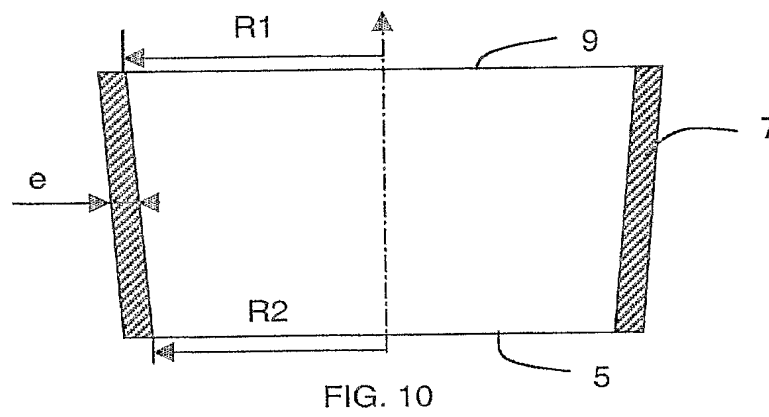
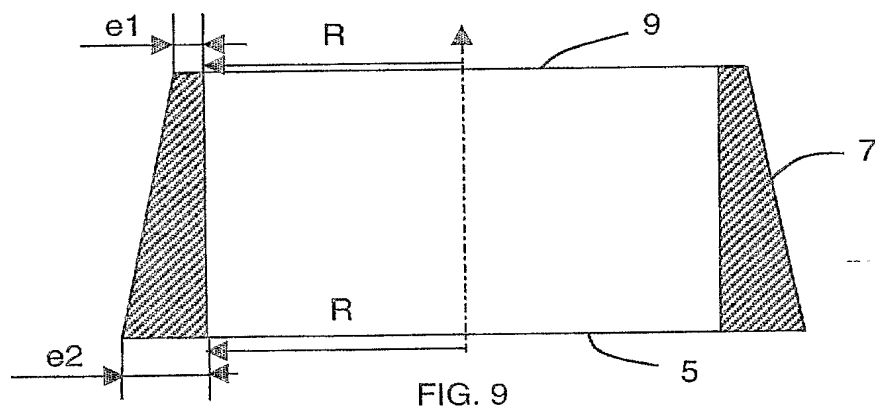
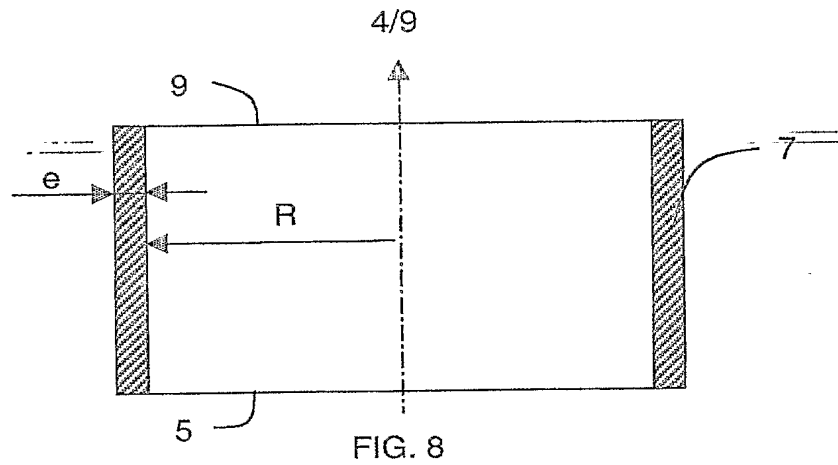


FIG. 5





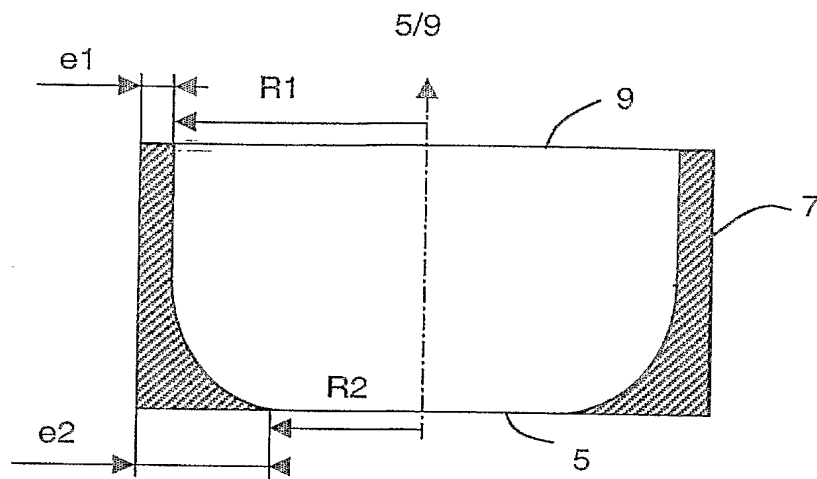


FIG. 12

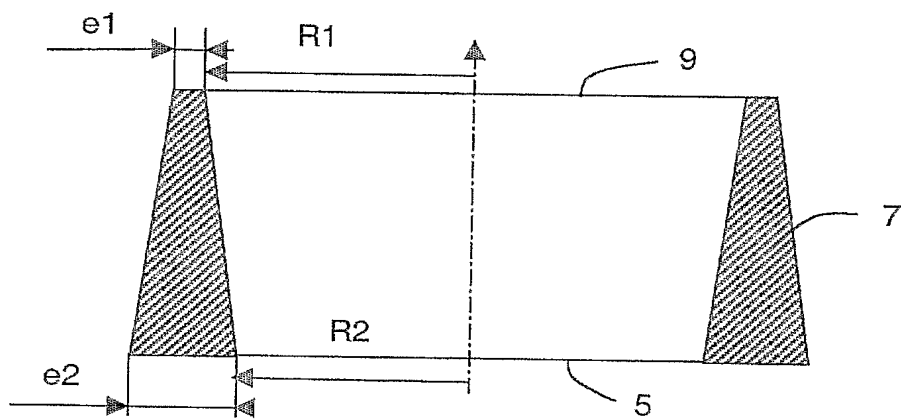


FIG. 13

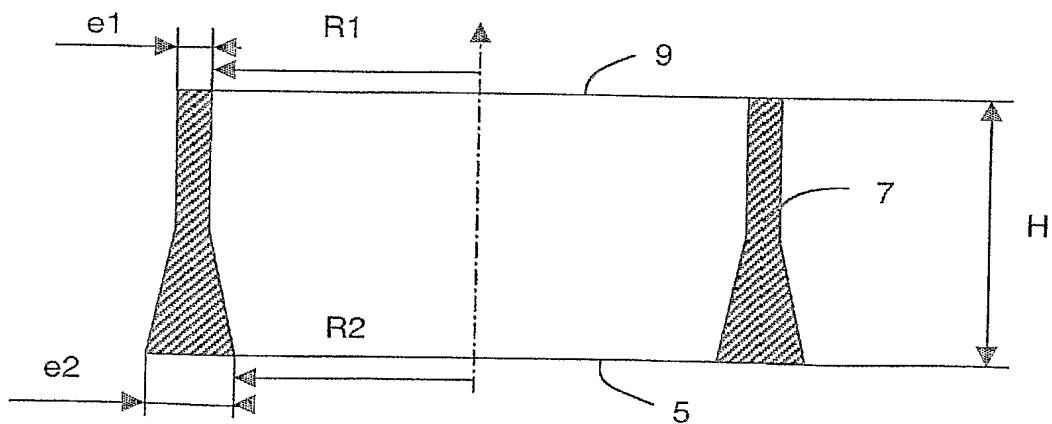


FIG. 14

6/9

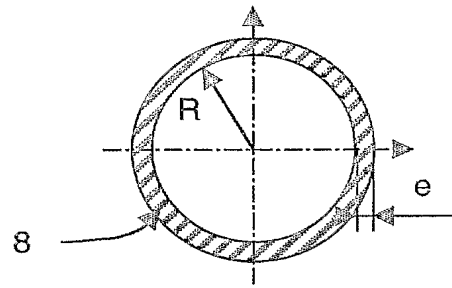


FIG. 15

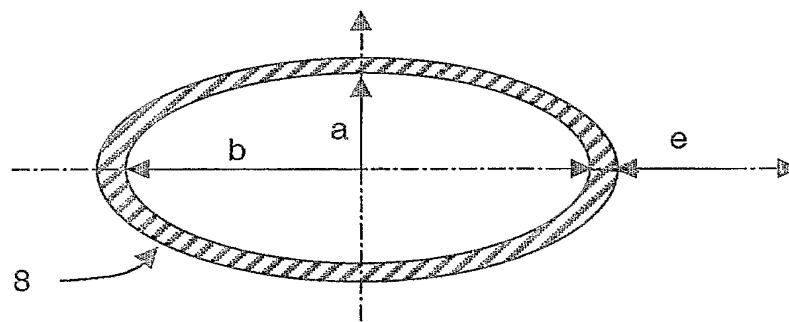


FIG. 16

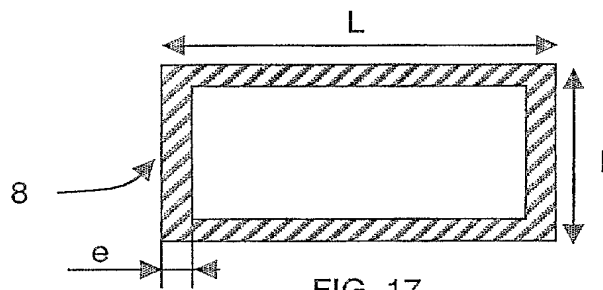
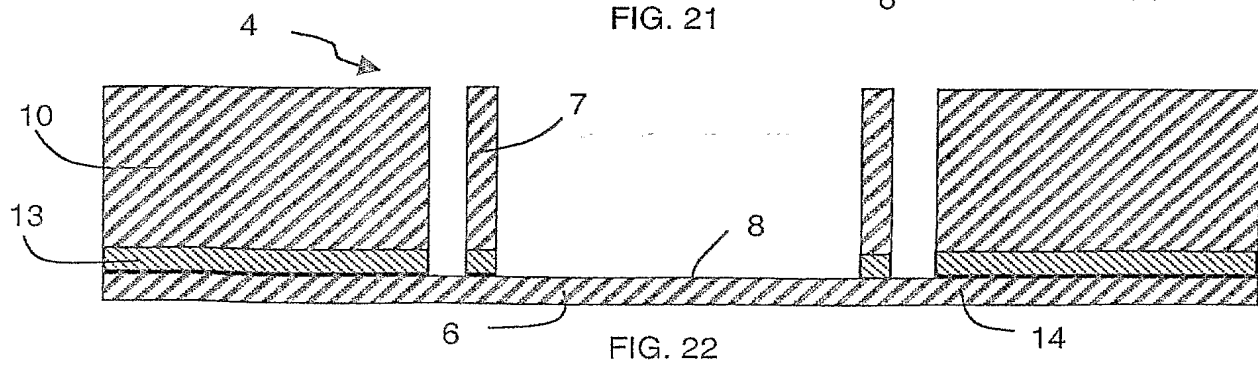
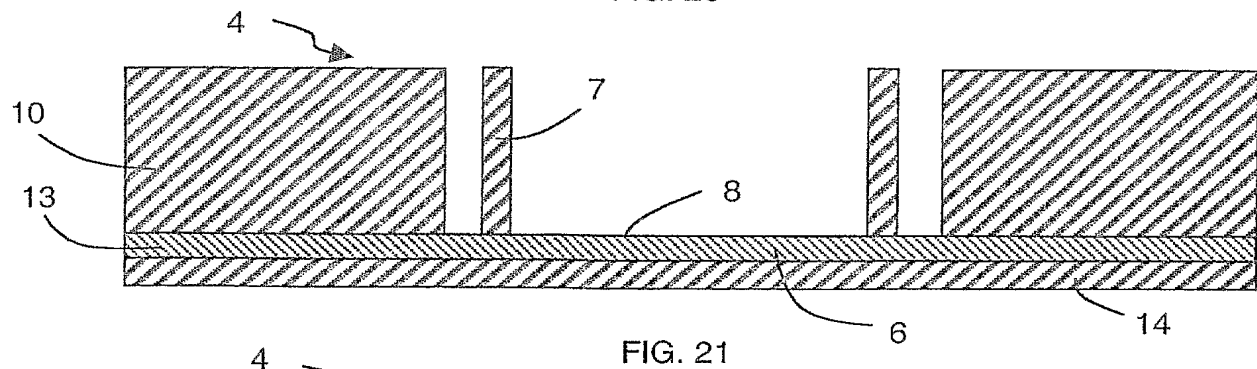
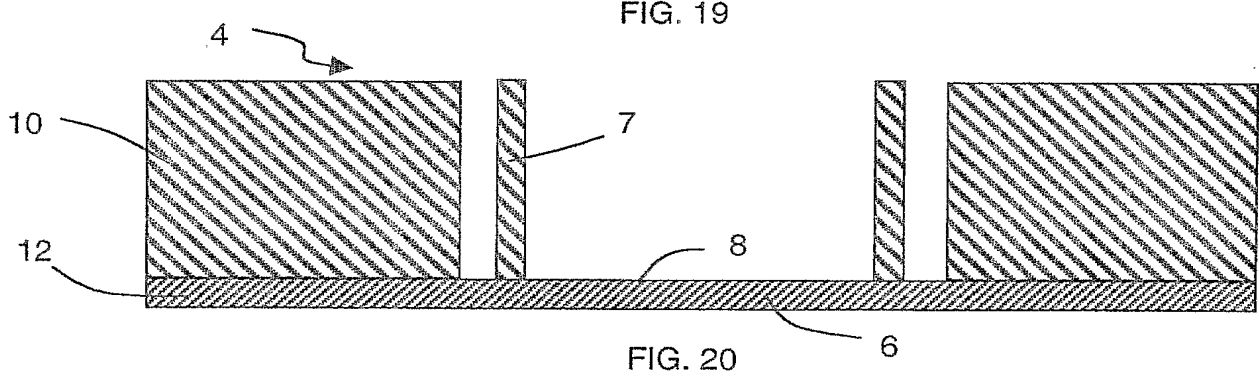
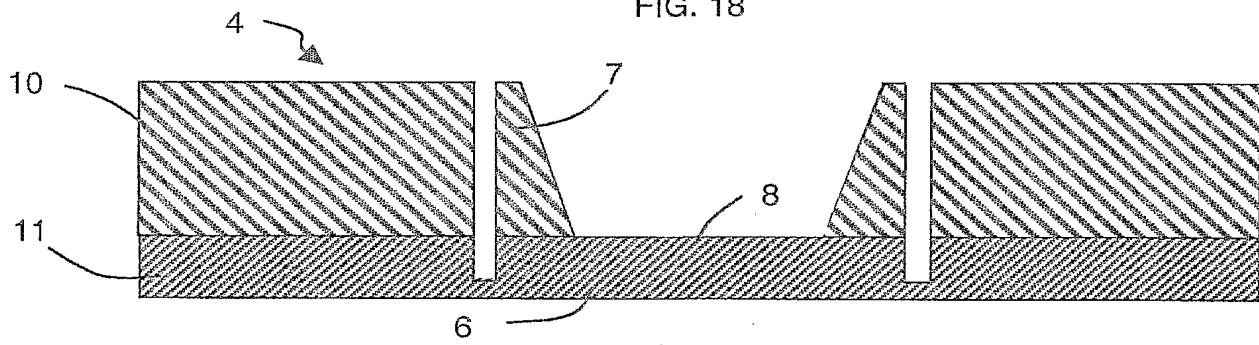
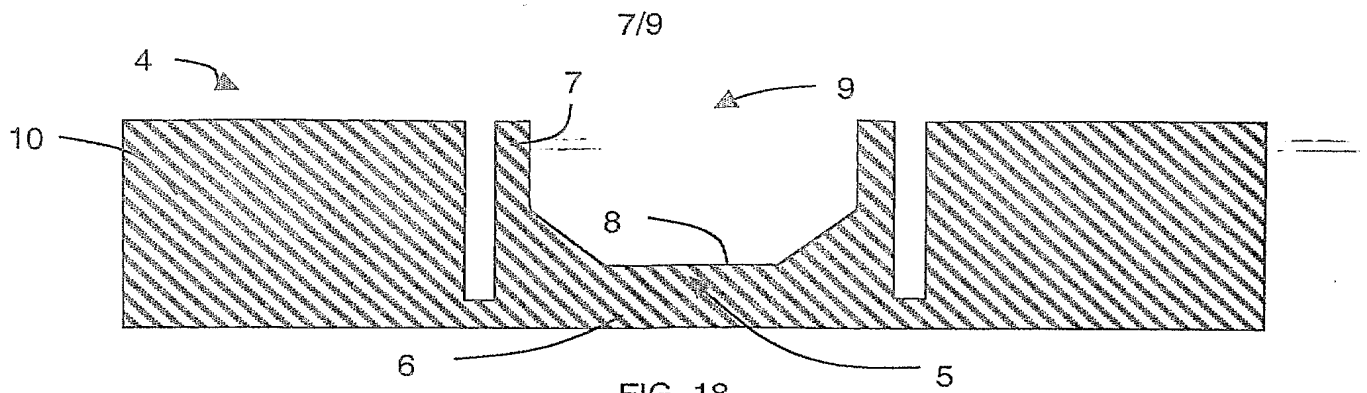


FIG. 17



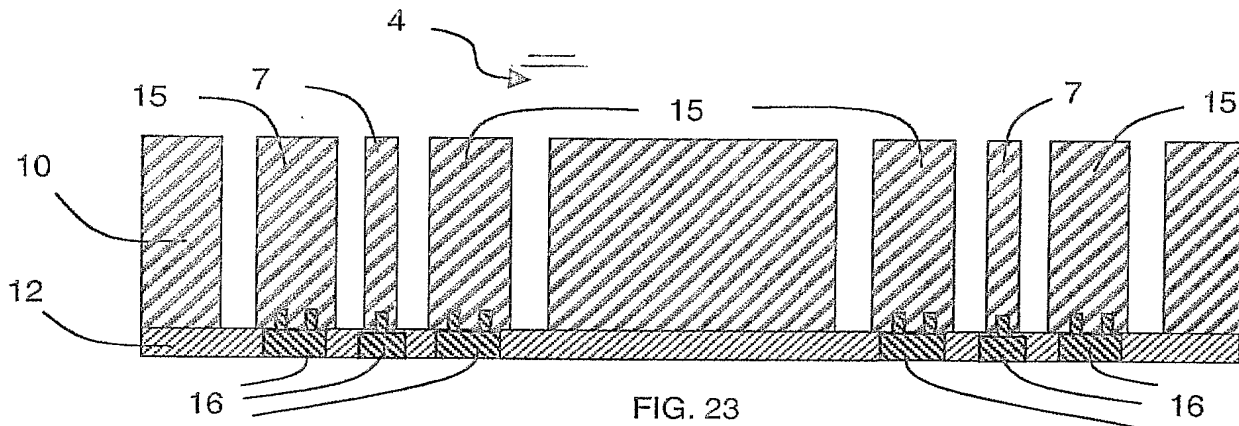


FIG. 23

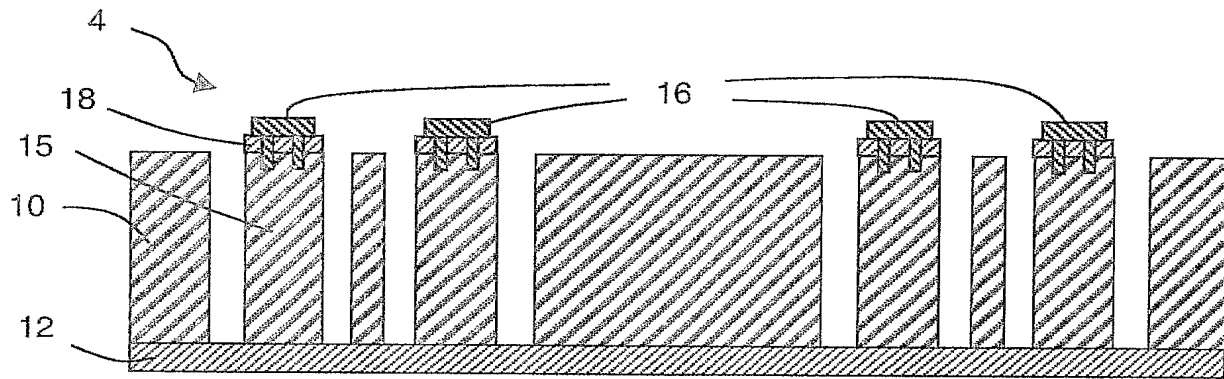


FIG. 24

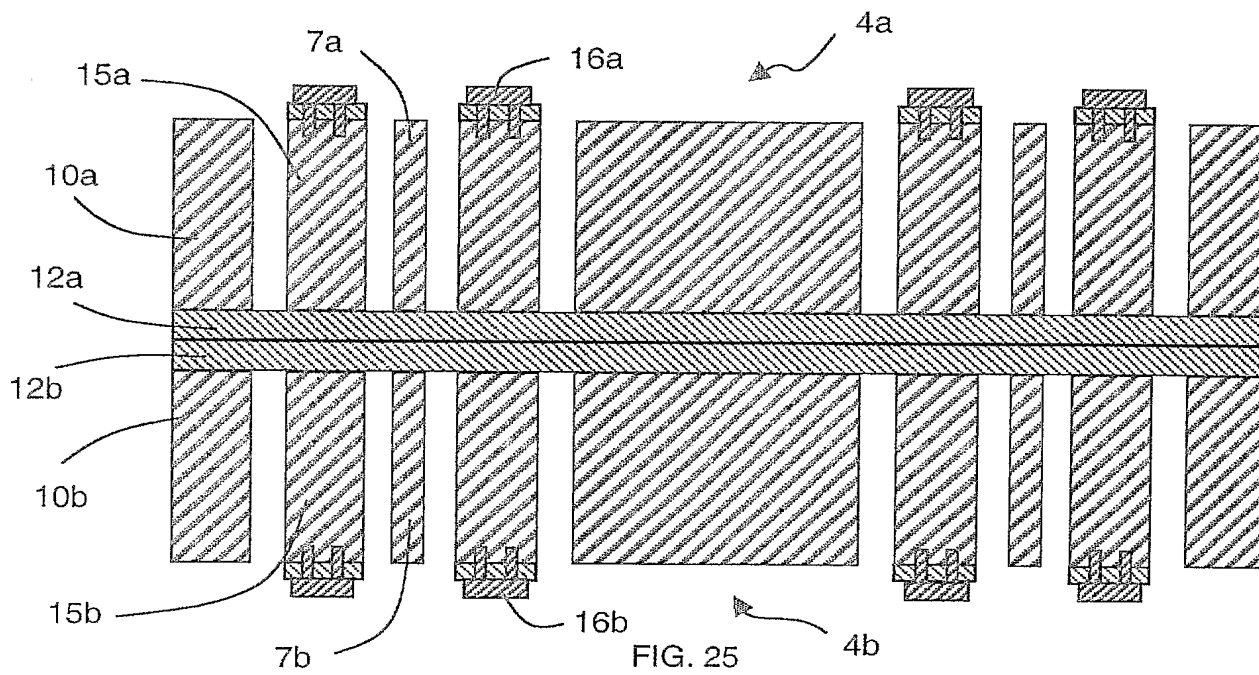
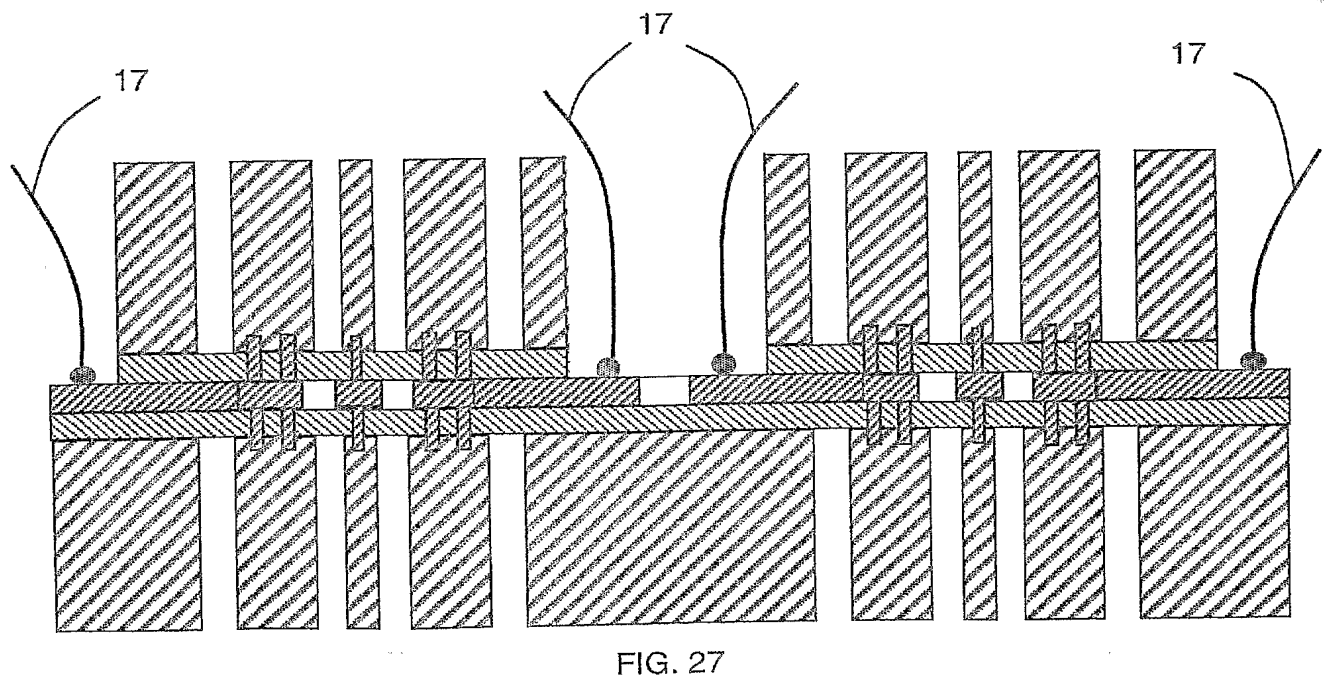
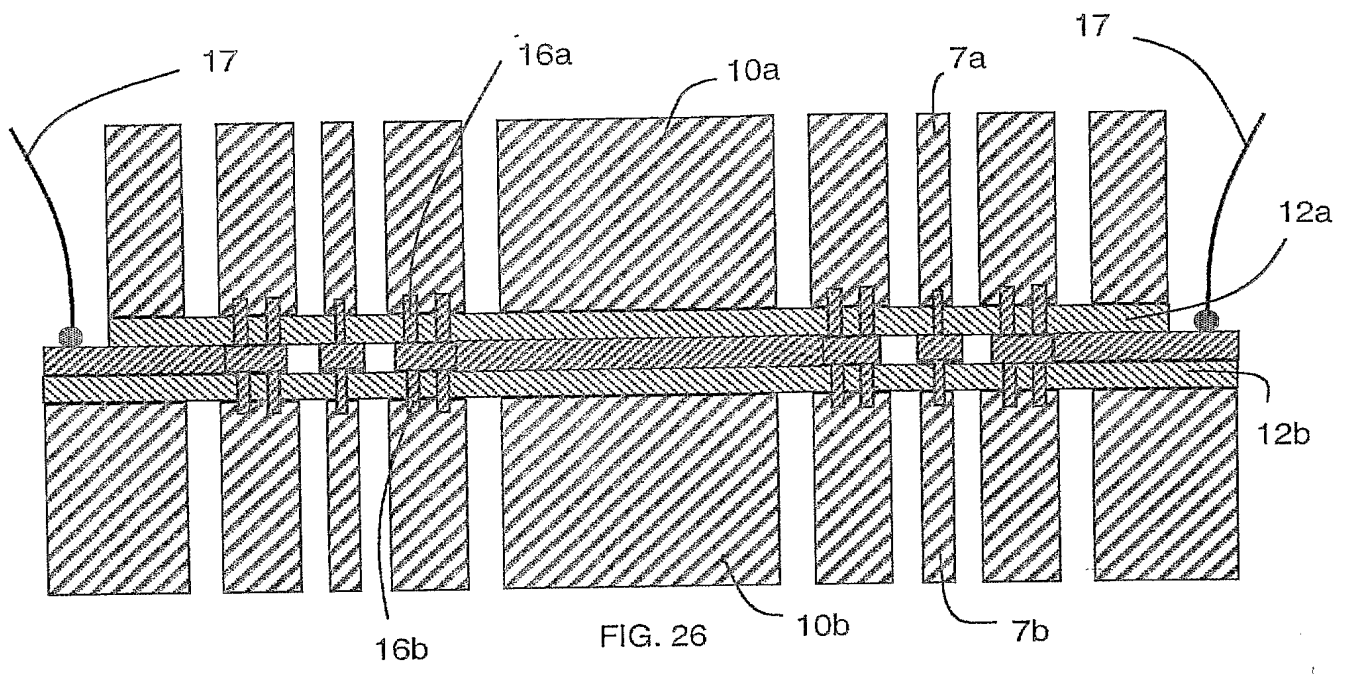


FIG. 25





DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

**DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S)** Page N° 1/ 1

(À fournir dans le cas où les demandeurs et  
les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 @ W / 270601

**Vos références pour ce dossier (facultatif)**

**PA1819FR**

**N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL**

**03 149 73**

**TITRE DE L'INVENTION** (200 caractères ou espaces maximum)

**Structure vibrante micro-usinée et microgyromètre associé**

**LE(S) DEMANDEUR(S) :**

**Commissariat à l'Energie Atomique**

**DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :**

<b>1</b> Nom		<b>Delevoye</b>
Prénoms		<b>Elisabeth</b>
Adresse	Rue	<b>33 rue Abbé Grégoire</b>
	Code postal et ville	<b>38000 Grenoble</b>
Société d'appartenance (facultatif)		
<b>2</b> Nom		
Prénoms		
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
<b>3</b> Nom		
Prénoms		
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		

S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.

**DATE ET SIGNATURE(S)**

**DU (DES) DEMANDEUR(S)**

**OU DU MANDATAIRE**

(Nom et qualité du signataire)

**Gérard Hecké**

**CPI 95-1201**

**Marie-Andrée Jouvray**

**CPI 01-0410**